

Спектр космических лучей в области энергий выше «колена», измеренный на установках PRISMA-32 и PRISMA-YBJ

Олег Щеголев

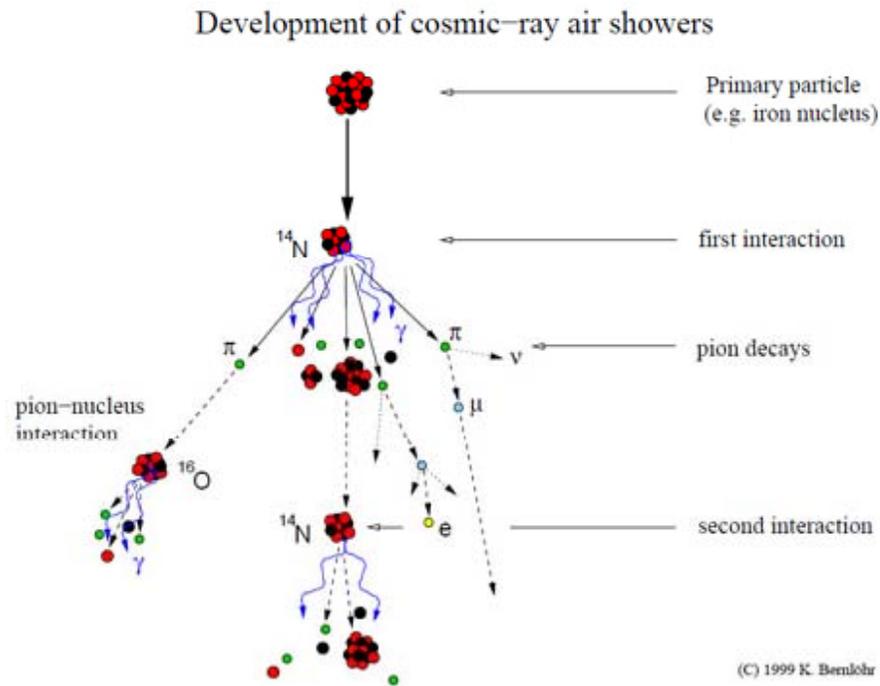
Институт ядерных исследований Российской академии наук

X Зацепинские чтения, 07.06.2019

План доклада

- Проект PRISMA (PRImary Spectrum Measurement Array)
- Результаты полученные на прототипах PRISMA-32 и PRISMA-YBJ
- Заключение

ШАЛ – это ядерный каскад в атмосфере!

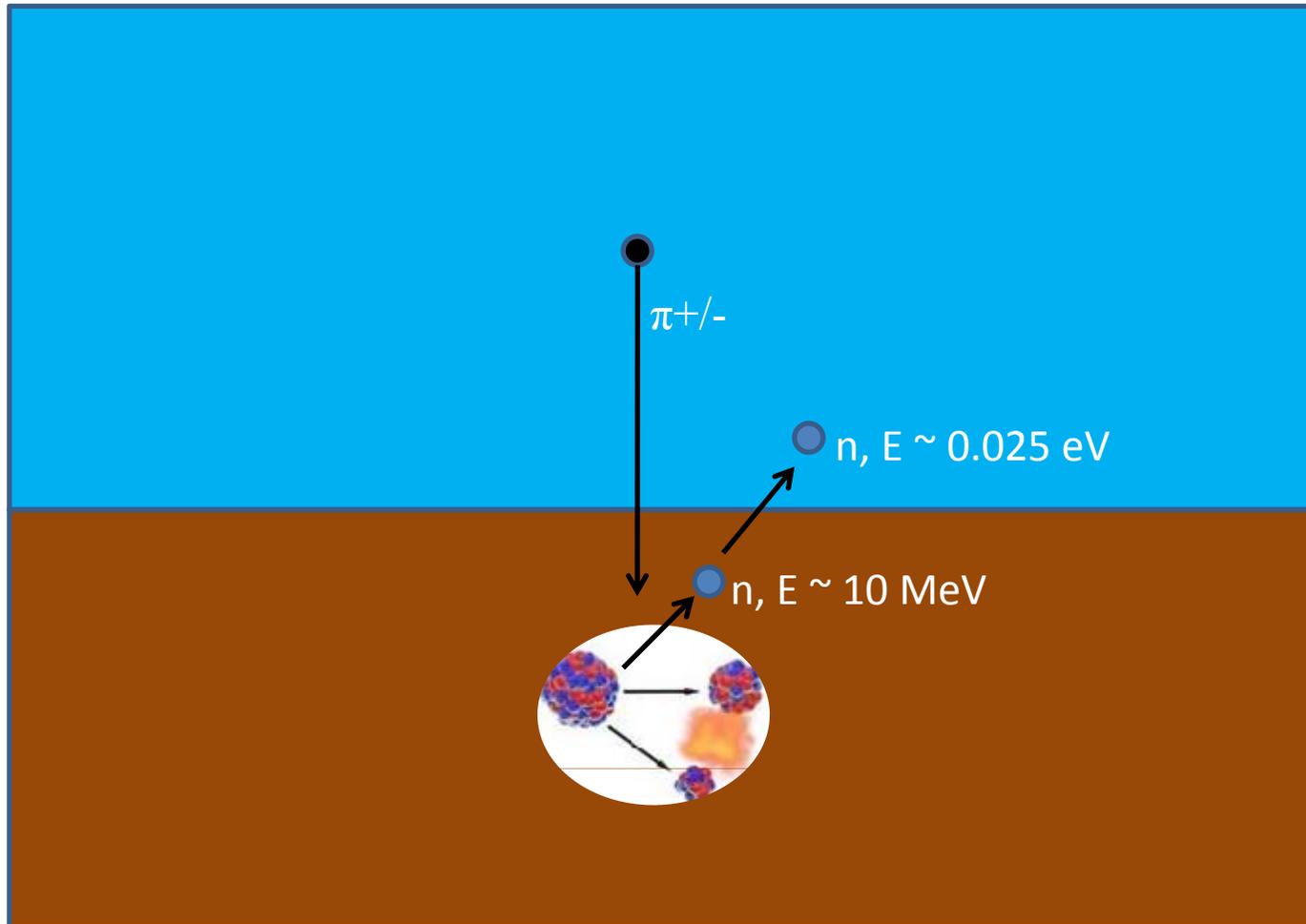


«Новая схема развития атмосферных ливней предполагает, что:

1. Начало развития ливня обусловлено столкновением первичного протона или более тяжелого ядра сверхвысокой энергии с ядром одного из атомов воздуха в атмосфере Земли.
2. В акте такого столкновения рождаются новые ядерно-активные частицы. Последующие столкновения каждой из них с атомными ядрами приводят к каскадному процессу размножения ядерно-активных частиц.
3. Рождающиеся в процессах ядерных столкновений нейтральные π -мезоны при своём распаде дают начало электронно-фотонной компоненте ливня, развитие которой описывается электромагнитной лавинной теорией.
4. Заряженные π -мезоны при своём распаде дают μ -мезонную компоненту широких атмосферных ливней»

(Г.Т. Зацепин, 1954)

Тепловые нейтроны в ШАЛ

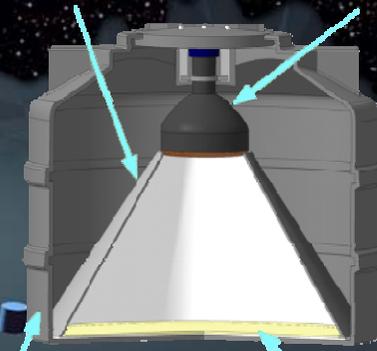


(PRImary Spectrum Measurement Array)

En-detector design

light-collecting cone

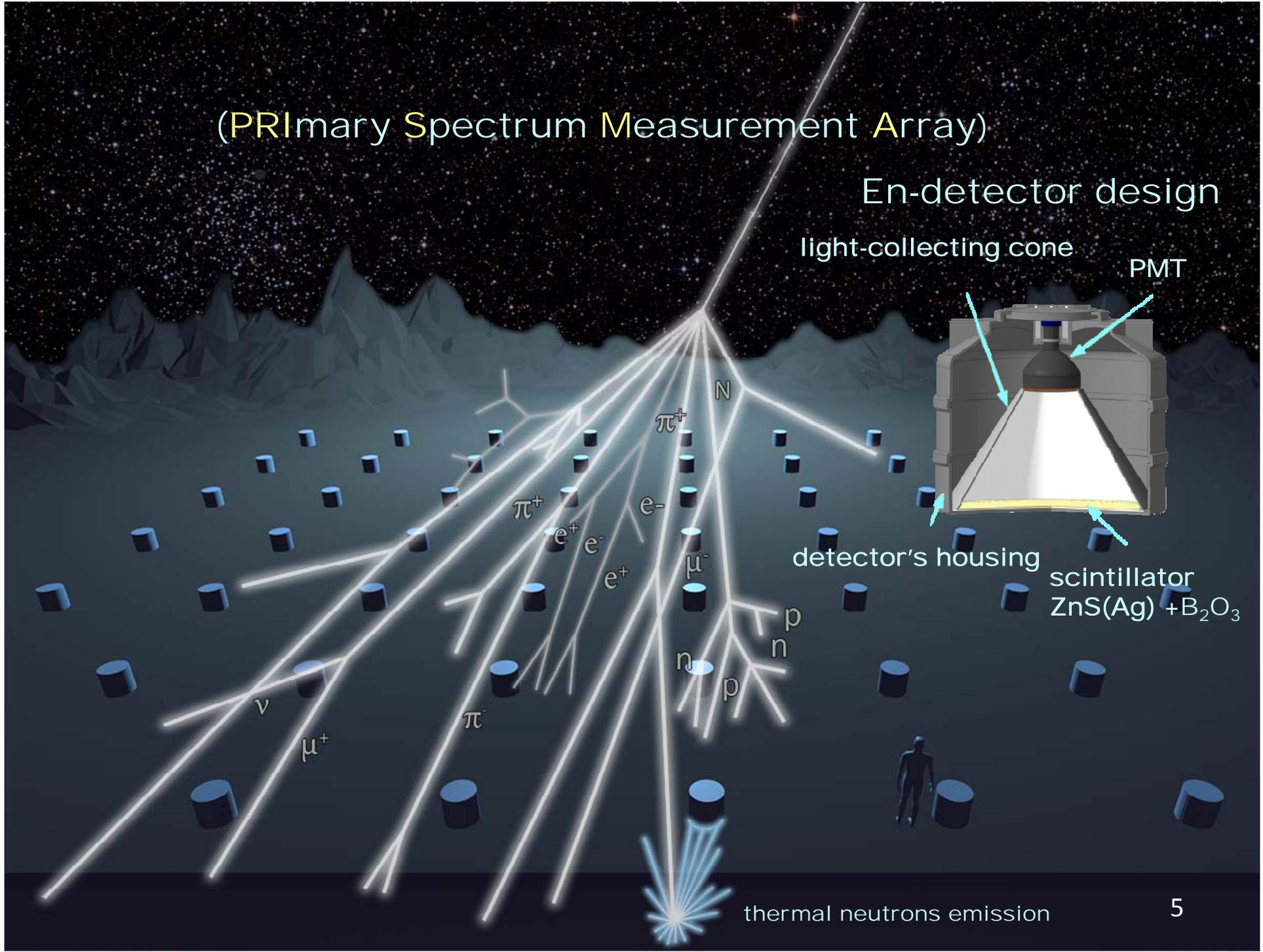
PMT



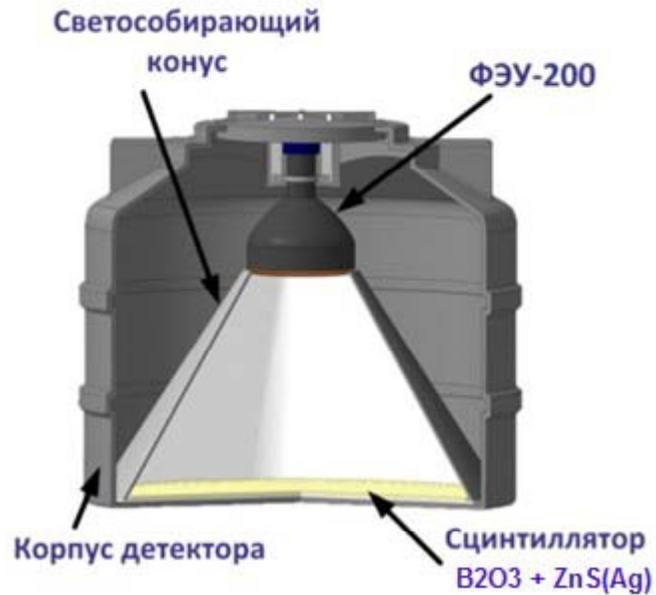
detector's housing

scintillator
ZnS(Ag) + B₂O₃

thermal neutrons emission



Электронно-нейтронный детектор



первый эн-детектор в составе установки «Мультик», БНО ИЯИ РАН, здание установки «Ковер», 2005 г.

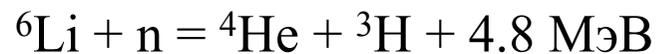
Эн-детектор способен регистрировать совместно:

- 1) электромагнитную компоненту ШАЛ (светосостав чувствителен к множественному прохождению заряженных частиц благодаря ZnS(Ag))*
- 2) задержанные термализовавшиеся испарительные нейтроны, рожденные адронами ШАЛ в окружающем веществе*



Эн-детектор установки PRISMA-32, НОЦ НЕВОД, МИФИ, (2011 г.).

СЦИНТИЛЛЯТОР



Сечение захвата теплового нейтрона

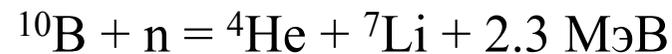
на ${}^6\text{Li} = 946$ барн



Заламинированный на белых листах
бумаги сцинтиллятор



Li обогащен изотопом ${}^6\text{Li}$ до 90%
толщина 30 мг/см², эффективность
захвата нейтронов ~ 20%

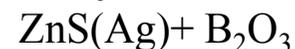


Сечение захвата теплового нейтрона

на ${}^{10}\text{B} = 3880$ барн

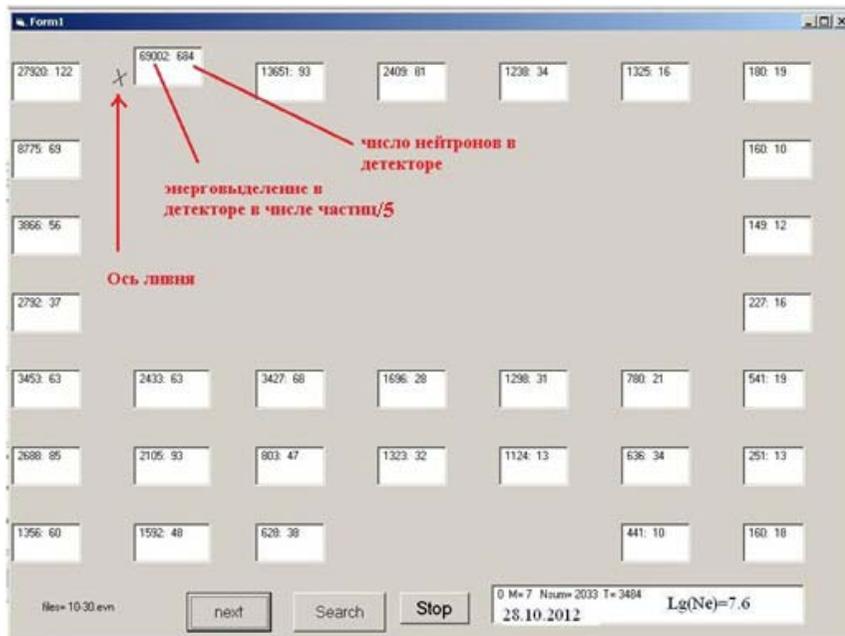
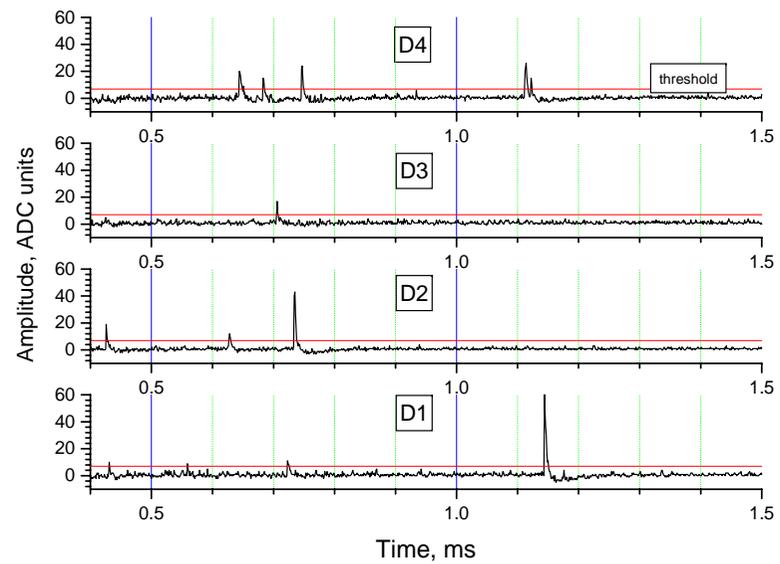
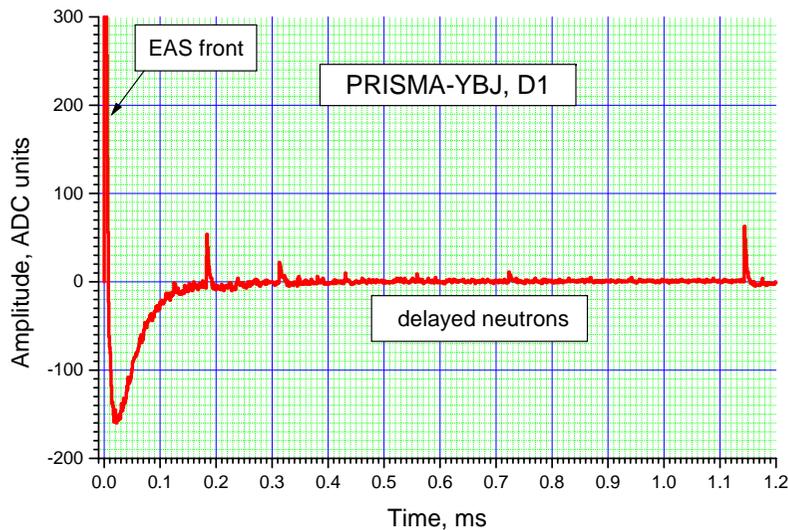


Залитый в силиконовый компаунд на
белом листе бумаги сцинтиллятор



Обычный B содержит 20% изотопа ${}^{10}\text{B}$
толщина 50 мг/см², эффективность
захвата нейтронов ~ 20%

Нейтроны в ШАЛ



В режиме регистрации ШАЛ производится оцифровка сигналов с эн-детекторов установки в течении 20 мс с шагом 1 мкс.

Триггером служит одновременное превышение порога срабатывания любых двух детекторов.

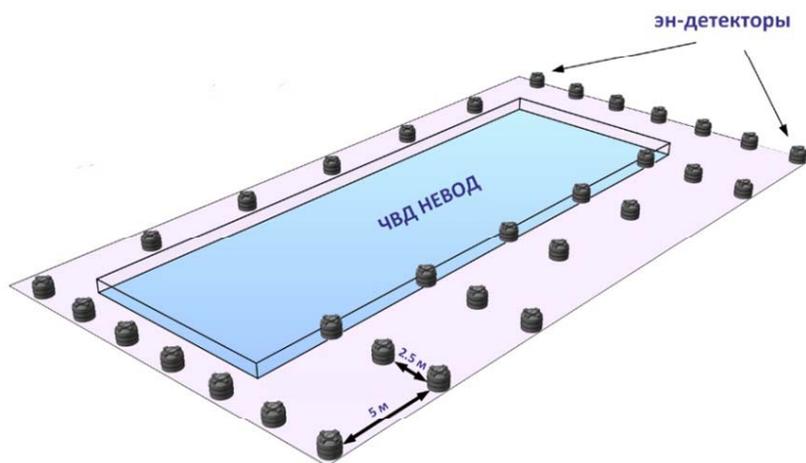
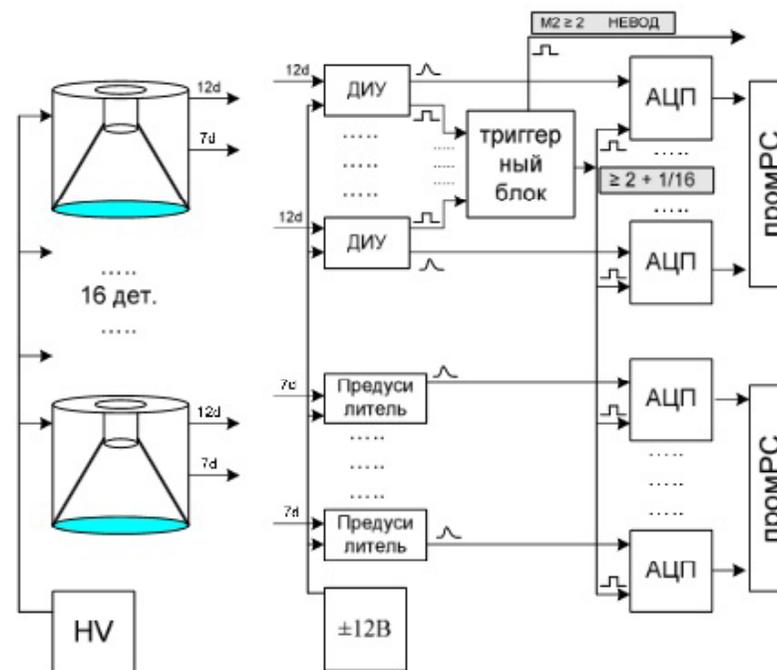
Показание в первую мкс соответствует прохождению электромагнитной компоненты ливня через сцинтиллятор, а задержанные импульсы – термализовавшимся испарительным нейтронам, рожденным адронами ШАЛ

электронно-нейтронный детектор VS адронный калориметр

Параметр	эн-детектор	адронный калориметр
объект регистрации	вторичные тепловые нейтроны, рождённые высокоэнергичными адронами в стволе	высокоэнергичные адроны на некотором удалении от оси
число адронов	можно оценить	измеряется
энергия адронов	-	измеряется
динамический диапазон	$\sim 10^4$ нейтронов/м ²	~ 5 адронов/м ²
электромагнитная компонента	измеряется	-
площадь	$\sim 10^2 - 10^4$ м ²	$\sim 10^2$ м ²
простота изготовления	просто	сложно
простота транспортировки	просто	сложно
цена	низкая	высокая

2012

PRISMA-32



установка PRISMA-32 – это прототип проекта PRISMA, состоящий из 32-х эн-детекторов, расположенный в НОЦ НЕВОД (МИФИ, Москва), работает с 2012 года по настоящее время

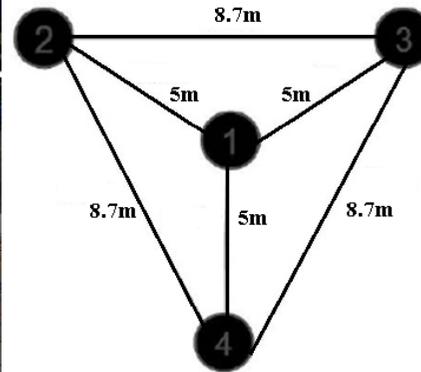
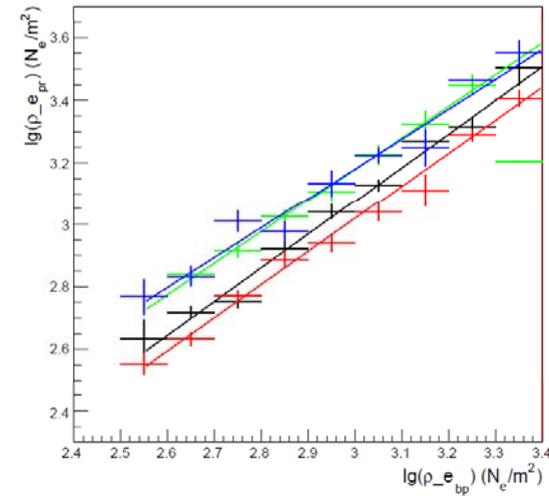
2013

PRISMA-YBJ

Плато Янгдажинг, Тибетский автономный округ,
Китай, 4300 м над уровнем моря

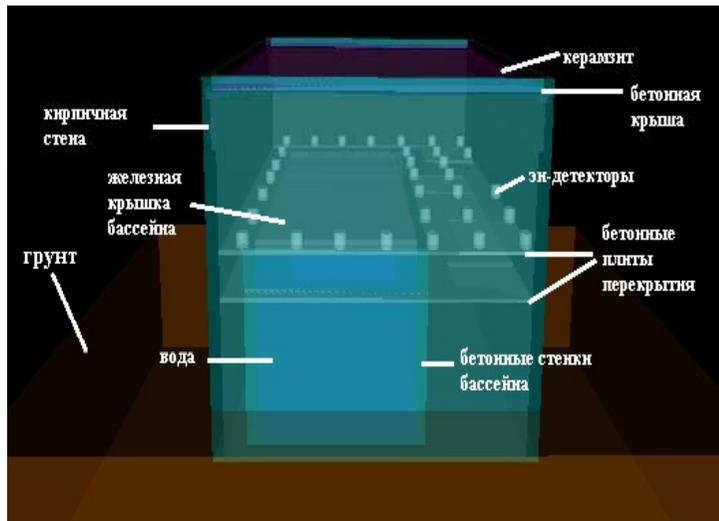


ПРОТОТИП
PRISMA-YBJ
(2013)



установка PRISMA-YBJ – это прототип проекта PRISMA, состоящий из 4-х эндетекторов, работавший в Тибете на плато YangBaJing на высоте 4300 м над уровнем моря с 2013 по 2017 г.

Моделирование



Для моделирования применялись пакеты CORSIKA7.5 и GEANT4.10.

В CORSIKA были использованы модели QGSJETII-04 и FLUKA_2016.

В GEANT4 были использованы модели QGSP, BIC и NeutronHP.

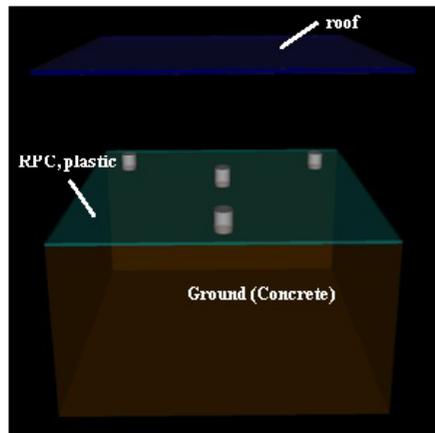
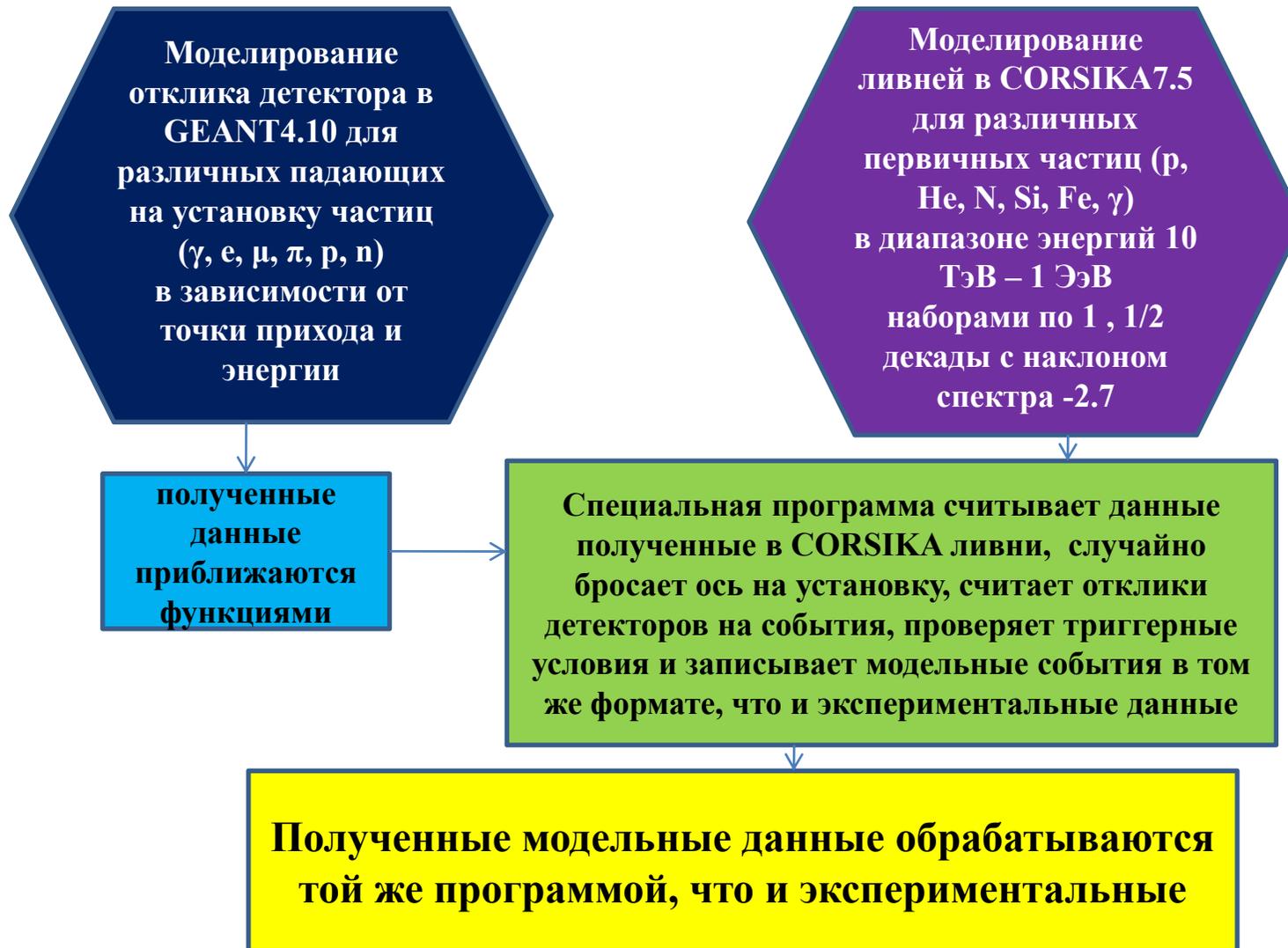


Схема моделирования



Сбор данных и статистика для PRISMA-32

Работает с 01.02.2012 по настоящее время

Условия отбора событий:

Ось ливня внутри площади установки 30x20 м

6-кратные совпадения с суммарным энерговыделением $\varepsilon > 24$ MIPs

Число триггеров – 2×10^5

Number of selected events – 10^5

Временные ворота для регистрации нейтронов - $T = 0.1 - 20$ ms

Эффективность регистрации нейтронов $\approx 8.5\%$

Все импульсы оцифровываются и применяется селекция нейтронных сигналов по форме импульса.

Сбор данных и статистика для PRISMA-YBJ

Работала с 30.08.2013 по 02.03.2017

Условия отбора событий

Ось внутри круга радиусом 6 м

4-кратные совпадения с суммарным энерговыделением $\varepsilon > 10 \text{ MIPs}$

Число триггеров – $3 \cdot 10^6$

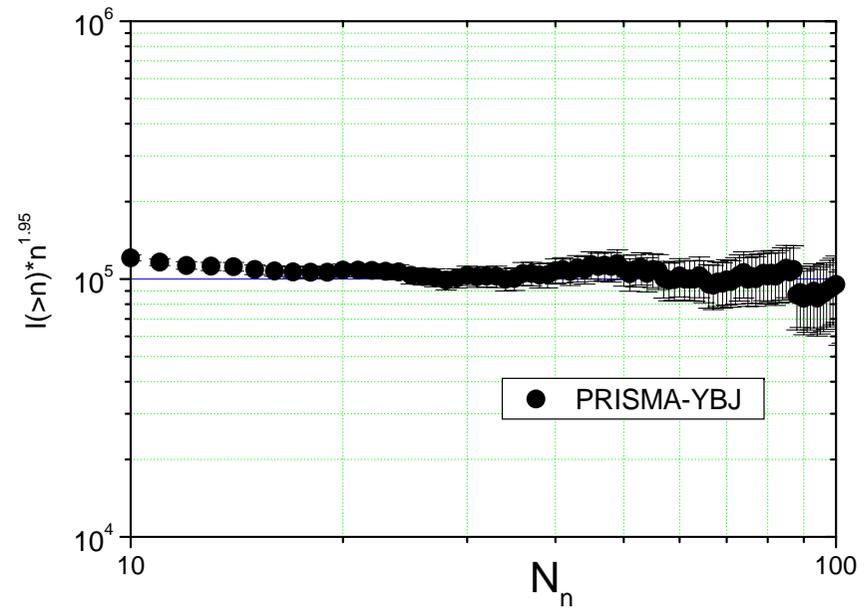
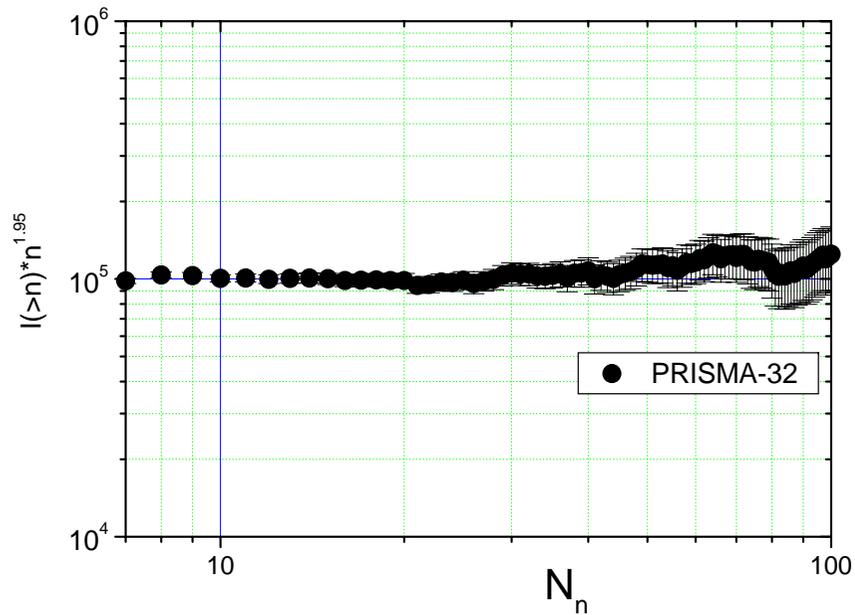
Число отобранных событий – 4×10^5

Временные ворота для регистрации нейтронов - $T = 0.1 - 20 \text{ ms}$

Эффективность регистрации нейтронов $\approx 13\%$

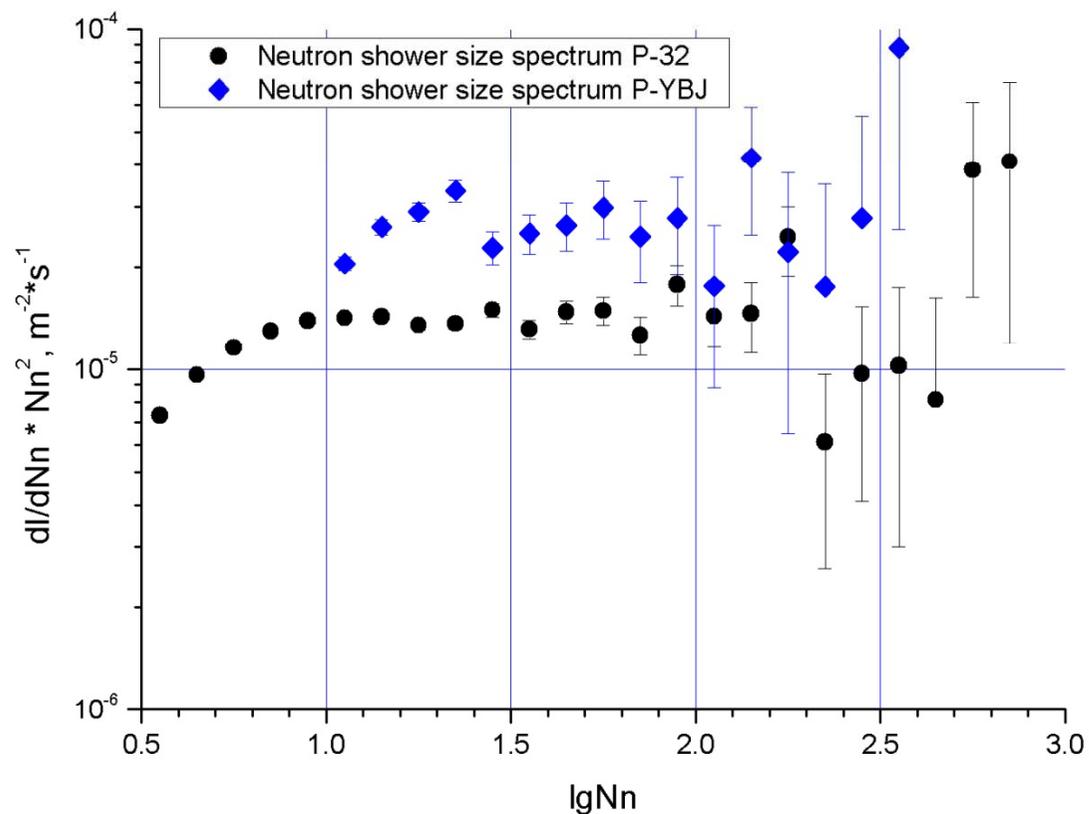
Все импульсы оцифровываются и применяется селекция нейтронных сигналов по форме импульса.

Спектр ШАЛ по числу нейтронов

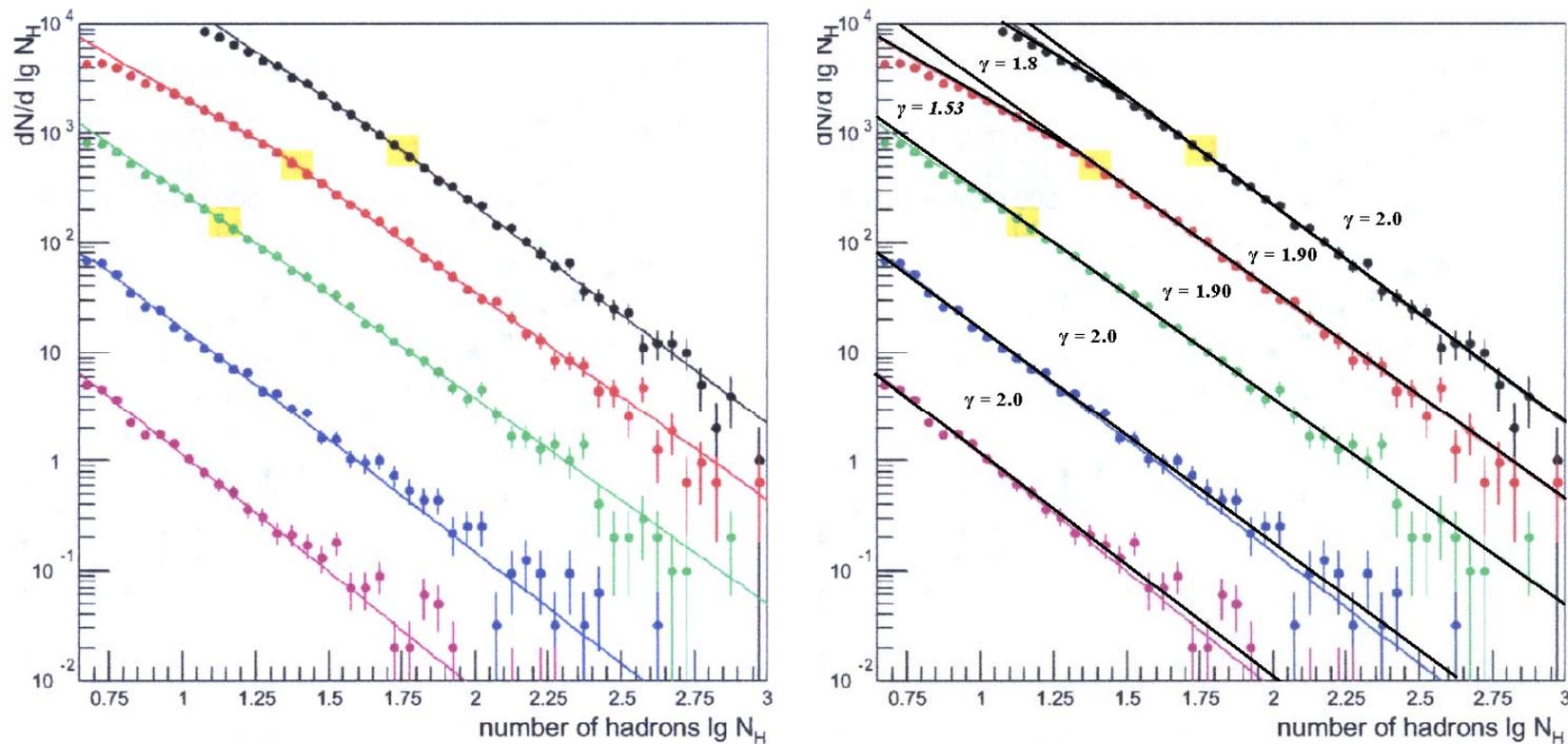


Полученный экспериментально наклон спектра ШАЛ по числу нейтронов равен 1.95 ± 0.05 для Москвы и 1.95 ± 0.05 для Тибета

Спектр ШАЛ по числу нейтронов с установок PRISMA-32 (7 лет) и PRISMA-YBJ (3.5 года)

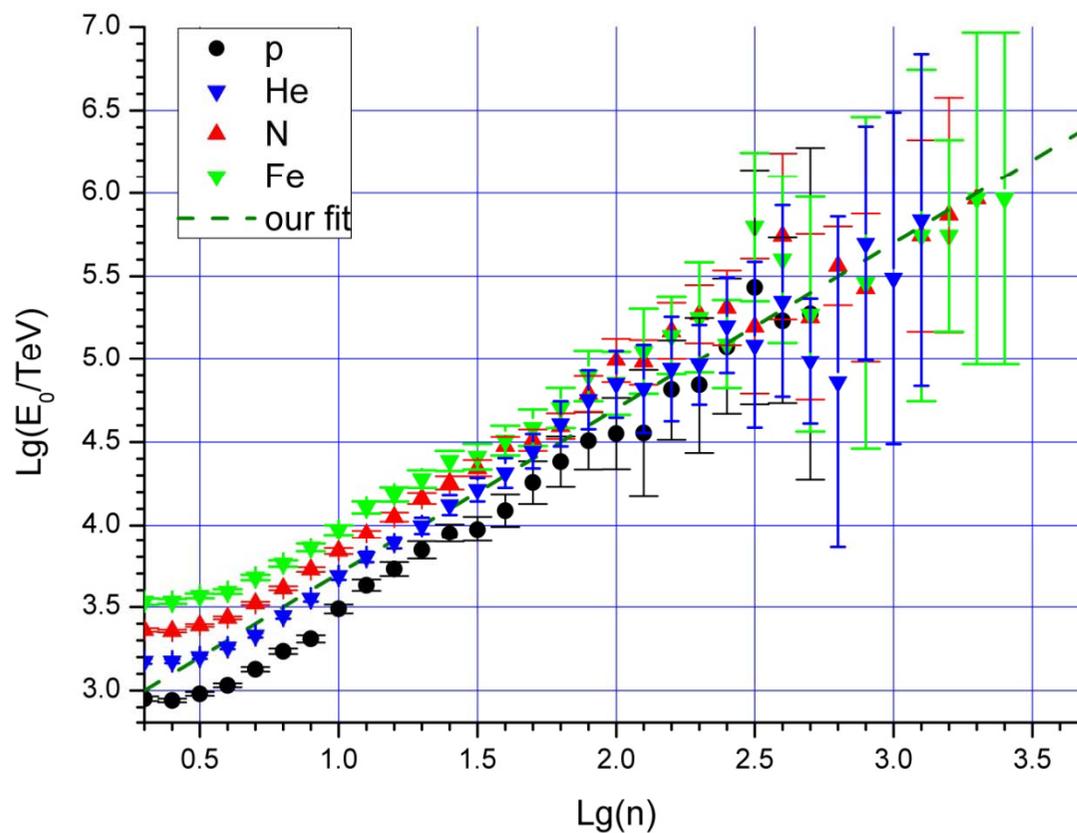


Спектр ШАЛ по числу высокоэнергичных адронов

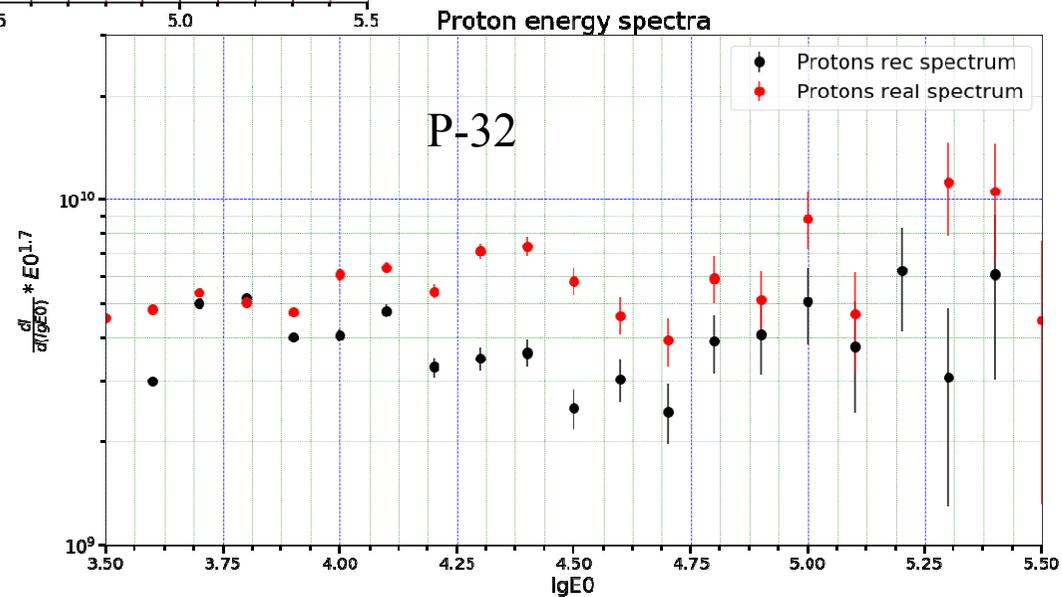
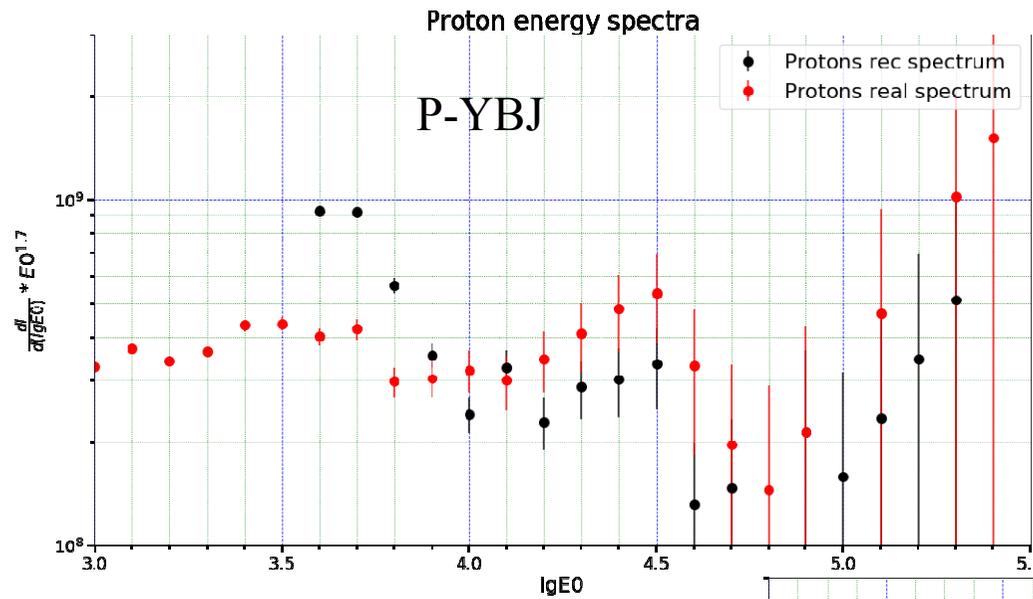


Спектры ШАЛ по числу высокоэнергичных адронов (для различных пороговых энергий от 50 ГэВ до 1 ТэВ), измеренный на адронном калориметре установки KASCADE из работы: Hörandel J. R. et al., Proc. 27th ICRC 1, 137 (2001)

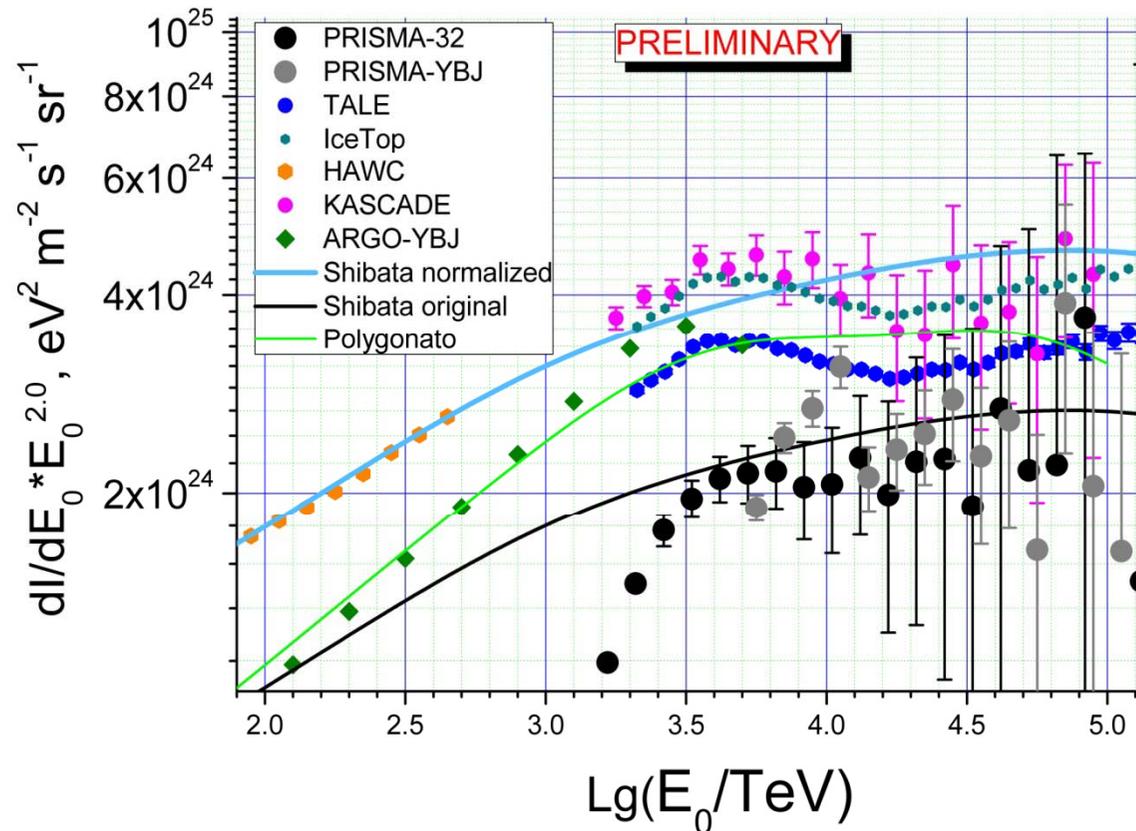
Зависимость среднего числа зарегистрированных нейтронов от энергии ливня для PRISMA-32



Восстановление энергетического спектра из спектра по числу нейтронов (моделирование)



Энергетический спектр ШАЛ с установок PRISMA-32 за 7 лет работы и PRISMA-YBJ за 3.5 года работы



Первичная энергия ливня восстанавливалась из числа зарегистрированных в событии нейтронов

Заключение

- Установка PRISMA-32 работает с 2012 года в непрерывном режиме. На данный момент накоплены данные за более чем 7 лет. Установка PRISMA-YBJ проработала с 2013 по 2016. Были накоплены данные за 3.5 года.
- На установках были измерены спектры ШАЛ по числу нейтронов. Результаты хорошо согласуются друг с другом.
- Наклон измеренного спектра ШАЛ по числу совпадает с наклоном спектра ШАЛ по числу высокоэнергичных адронов, измеренным установкой KASCADE.
- При помощи моделирования были получены зависимости числа зарегистрированных нейтронов от первичной энергии ливня.
- Из спектров по числу нейтронов были восстановлены энергетические спектры ШАЛ в диапазоне энергий 3 – 40 ПэВ. Спектры не противоречат результатам полученным в других экспериментах.

Спасибо за внимание